

УДК 669-1

**М. С. Ткачёв<sup>\*</sup>, А. С. Луговская, А. Г. Пилипенко, А. И. Морозова**

НИУ «БелГУ», г. Белгород

<sup>\*</sup>1196634@bsu.edu.ru

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. Н. Беляков

## ВЛИЯНИЕ РКУП-КОНФОРМ НА МИКРОСТРУКТУРУ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu–Cr–Zr

Исследована эволюция микроструктуры сплава Cu–0,1 %Cr–0,1 %Zr в процессе равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-Конформ). Определено изменение размера зерен, плотности дислокаций и доли большеугловых границ. Установлено, что в процессе РКУП-Конформ развивается непрерывная динамическая рекристаллизация, увеличивается плотность дислокаций и формируется ультрамелкозернистая структура.

*Ключевые слова:* РКУП-Конформ, медные сплавы, пластическая деформация, микроструктура

**M. S. Tkachev, A. S. Lugovskaya, A. G. Pilipenko, A. I. Morozova**

## EFFECT OF ECAP-CONFORM ON MICROSTRUCTURE OF A LOW ALLOYED Cu–Cr–Zr ALLOY

The microstructure evolution of a low alloyed Cu–0,1 %Cr–0,06 %Zr alloy during equal channel angular pressing with the Conform process (ECAP-C) was investigated. The changes of grain size, dislocation density and high-angle boundary fraction were estimated. The continuous dynamic recrystallization was developed, dislocation density increased and ultrafine grained microstructure formed during ECAP-C.

*Key words:* ECAP-C, copper alloys, plastic deformation, microstructure

**А**нализ механизмов эволюции микроструктуры медных сплавов системы Cu–Cr–Zr в процессе больших пластических деформаций является актуальным научным направлением, поскольку формирующиеся в процессе деформации структурные дефекты влияют как

на механические, так и на проводящие свойства этих перспективных электротехнических сплавов [1].

В качестве материала исследования был взят сплав Cu–0,1 %Cr–0,1 %Zr (масс. %). Сплав был подвергнут термической обработке на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С 1 ч с охлаждением в воде. После термической обработки средний размер зерен составил 120 мкм, а плотность дислокаций —  $2,5 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$  (рис., а). Экспериментальные образцы подвергли РКУП-К в оснастке с углом пересечения каналов матрицы 120° при комнатной температуре по маршруту В<sub>С</sub> (рис., е).

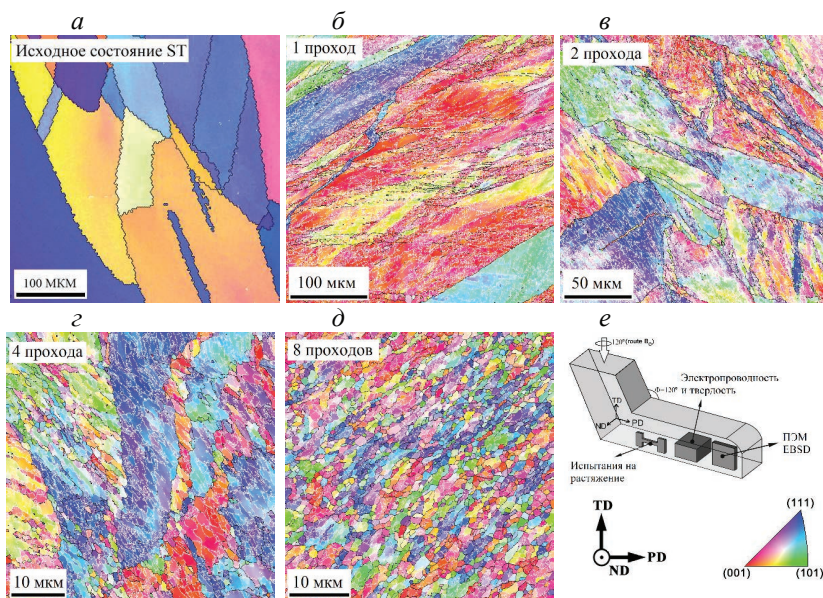


Рис. Микроструктура сплава Cu–Cr–Zr:

а — исходное состояние, б — после 1 прохода РКУП-К, в — после 2 проходов РКУП-К, г — после 4 проходов РКУП-К, д — после 8 проходов РКУП-К, е — схема деформации образцов.

Обратные полюсные фигуры показаны для направления ND

Исследования микроструктуры проводили методом EBSD-анализа с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoSEM 450. Долю большеугловых границ (БУГ) и средний угол разориентировки границ определяли с помощью программного обеспечения TSL

OIM Analysis 6. Средний размер зерен был рассчитан методом секущих, как среднее расстояние между БУГ в поперечном и продольном направлениях. Плотность границ определяли, как отношение длины границ к площади изображения микроструктуры. Плотность дислокаций определяли с помощью анализа микронапряжений (функция Kernel Average Misorientation) [2].

После 1 прохода РКУП-К формируются параллельные БУГ вблизи исходных границ зерен, внутри зерен образуются малоугловые границы. Исходные зерна вытягиваются в направлении течения металла (рис., б). После 2 прохода РКУП-К увеличивается плотность малоугловых границ (рис. 1, в). После 4 прохода РКУП-К растет доля БУГ. Параллельные БУГ разделяются поперечными БУГ, что приводит к формированию новых мелких зерен размером меньше 1 мкм (рис., г). После 8 прохода РКУП-К формируется однородная ультрамелкозернистая структура с высокой долей БУГ (рис., д). Формирование малоугловых границ с последующей трансформацией их в БУГ в процессе РКУП-К свидетельствует о развитии непрерывной динамической рекристаллизации.

Изменение структурных параметров в процессе РКУП-К Cu–Cr–Zr сплава представлено в таблице.

Таблица

Параметры микроструктуры сплава Cu–0,1 %Cr–0,1 %Zr после РКУП-К

Состояние	Размер зерен (мкм)	Плотность дислокаций ( $\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ )	Доля большеугловых границ	Средний угол разориентировки (суб) границ, °	Плотность (суб)границ, ( $\times 10^6 \text{ м}^{-1}$ )
Исходное состояние	120	0,3	0,91	48,2	0,000025
1 проход	21,93	3,9	0,11	7,4	1,1
2 проход	9,15	5,4	0,13	8,6	2,0
4 проход	3,27	6,7	0,17	9,5	5,7
8 проход	1,07	5,9	0,36	16,0	4,5

Средний размер зерен уменьшается с ростом степени деформации и после 8 проходов РКУП-К составляет 1,07 мкм. РКУП-К до 4 проходов сопровождается увеличением плотности дислокаций и границ

кристаллитов ( $6,7 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$  и  $5,7 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответственно). Дальнейшая деформация приводит к незначительному снижению плотности дислокаций. Средний угол разориентировки и доля БУГ постепенно увеличиваются с ростом степени деформации. После 8 проходов РКУП-К доля БУГ составляет 0,36, средний угол разориентировки границ —  $16,0^\circ$ .

*Выражаем благодарность профессору Г. И. Рааб за помощь в проведении операции РКУП-Конформ.*

### **Литература**

1. Рааб Г. И., Валиев Р. З. Равноканальное угловое прессование по схеме «Конформ» длинномерных наноструктурных полуфабрикатов из титана // Кузнечно-штамповое производство. Обработка металлов давлением. 2008. Т. 1. С. 21–27.
2. Grain refinement kinetics and strengthening mechanisms in Cu–0,3Cr–0,5Zr alloy subjected to intense plastic deformation / A. P. Zhilyaev [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 654. P. 131–142.